doi:10.13866/j.azr.2018.06.21

差巴嘎蒿叶浸提液对4种沙地草本植物种子萌发的化感作用①

丁杰萍[1]， 闫志强[2]， 陈银萍[2]， 李玉强[3]， 罗永清[3]

（1. 甘肃省环境科学设计研究院，甘肃 兰州 730000；2. 兰州交通大学环境与市政工程学院，甘肃 兰州 730070；3. 中国科学院西北生态资源环境研究院，甘肃 兰州 730000）

摘 要：差巴嘎蒿是沙地恢复过程中植被演替的重要物种，是半流动沙丘的优势物种之一。本文从化感作用角度，研究了不同浓度差巴嘎蒿叶浸提液（0、10、20、40、60、80 $g \cdot L^{-1}$和100 $g \cdot L^{-1}$）对狗尾草、达乌里胡枝子、大果虫实和冰草的种子萌发的影响。结果表明：差巴嘎蒿叶浸提液对狗尾草种子萌发的影响较小，低浓度浸提液处理对其萌发有一定的促进作用，而对其他3个物种均表现为显著的抑制效应，且随处理浓度增加，抑制效应增大。差巴嘎蒿对其他物种的种子萌发均具有强烈的化感作用，通过叶片凋落后的物质释放形成的化感作用可能是其保持竞争优势的重要方式之一。

关键词：差巴嘎蒿（*Artemisia halodendron*）；化感作用；种子萌发；化感指数；植被演替；通辽市

化感作用（allelopathy）是指一种植物（供体）通过向环境释放化学物质，而对另一种植物或微生物（受体）所产生的直接或间接作用[1]，是植被演替过程中植物保持其竞争性的主要策略[2]，通常在植物生长的初期，即种子萌发和幼苗生长阶段产生效应[3-4]。植物体主要通过淋溶、挥发、根系分泌物或植物残体分解产生化感物质[5]。化感作用的研究已有很长的历史，是生态系统的重要现象之一，广泛应用于农业生产中，如连作障碍破除[6-7]、生物除草剂研发[8-9]等。在草地农业生产过程中也有一定的研究，如黄花草木樨（*Melilotus officinalis*）对苏丹草（*Sorghum sudanese*）和多花黑麦草（*Lolium multiflorum*）的生长具有显著的抑制作用[10]；瑞香狼毒（*Stellera chamaejasme*）可抑制红豆草（*Onobrychis viciaefolia*）的幼苗生长[11]；野生麻花秦艽（*Gentiana straminea*）的提取物能显著抑制3种豆科牧草紫花苜蓿（*Medicago sativa*）、红三叶（*Trifolium pratense*）和白三叶（*Trifolium repens*）种子的萌发[12]。此外，化感作用也被认为是入侵物种维持其竞争优势的主要策略[13-15]。

自20世纪50年代以来，由于人类活动和自然气候等因素的影响，科尔沁沙地沙漠化程度逐渐加剧[16-17]。近年来，由于人为保护力度的增加，沙漠化程度逐渐出现逆转的现象[16-17]。差巴嘎蒿（*Artemisia halodendron*）是用于该区生态恢复的主要物种之一[18-19]，在其完成生活史的过程中，通过叶凋落物的产生和分解[20]，以及根系的死亡周转[19]实现植物－土壤系统的物质循环，维持其竞争优势。在科尔沁沙地生态恢复过程中，差巴嘎蒿是植被恢复演替序列的主要先锋物种，最早出现在流动沙丘，并随着沙地的恢复逐渐成为优势物种；当沙地恢复到半流动/半固定沙丘阶段，差巴嘎蒿的重要值达到最大；此后随沙地的进一步恢复，逐渐被大果虫实（*Corispermum macrocarpum*）、达乌里胡枝子（*Lespedeza davurica*）等物种替代；到固定沙丘阶段，差巴嘎蒿完全退出植物群落[21-22]。另外，在沙地恢复的植被演替过程中，狗尾草（*Setaria viridi*）与差巴嘎蒿具有共存现象，且在流动沙丘、半流动/半固定沙丘和固定沙丘均有分布[23]。

目前，有关差巴嘎蒿与其他物种间关系方面的研究较少，尤其是差巴嘎蒿凋落物对其他物种种子萌发方面的研究未见报道。因此，本研究拟通过对

① 收稿日期：2018-06-11； 修订日期：2018-08-08
基金项目：国家自然科学基金项目（31500369，31560161）；中国科学院百人计划项目（Y551821001）；中国科学院西北生态环境资源研究院青年人才成长基金项目（Y651K21001）资助
作者简介：丁杰萍（1987－），女，工程师，硕士，主要从事环境保护与生态修复方面的研究. E-mail：dingjieping1@163.com
通讯作者：罗永清. E-mail：luoyongqing@lzb.ac.cn

差巴嘎蒿凋落物的化感作用测定,了解差巴嘎蒿叶凋落物对其他物种种子萌发的影响,以期从种子萌发角度探索差巴嘎蒿在沙地恢复过程中的生态学意义,为沙地生态恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于我国东北部的科尔沁沙地东南缘,地处内蒙古东部的通辽市奈曼旗(42°58′N,120°43′E)境内,平均海拔 345 m。该地区属于温带大陆性半干旱气候,多年平均降水量(1961—2017 年) 343 mm,其中 80% 发生在 6—9 月[24]。年平均气温为 6.7 ℃,月平均最高和最低气温分别为 24.3 ℃(7 月)和 −12.6 ℃(1 月),年平均蒸发量 1 935 mm,土壤类型为风沙土[25]。植被类型包括灌木黄柳(*Salix gordejevii*)、差巴嘎蒿和小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*),一年生草本沙米(*Agriophyllum squarrosum*)、狗尾草、大果虫实等,多年生草本主要有糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、达乌里胡枝子、羊柴(*Hedysarum laeve*)等。地貌以平缓的流动沙丘、半流动沙丘、固定沙丘、丘间低地和甸子地镶嵌分布。

1.2 实验材料

本研究以科尔沁沙地半流动沙丘优势物种差巴嘎蒿叶浸提液为处理材料。供试种子包括狗尾草、大果虫实、达乌里胡枝子和冰草 4 种。差巴嘎蒿兼具种子繁殖和营养繁殖的特性,且耐沙埋、易分蘖、根系深,极易在风沙活动强烈的流动和半固定沙丘存活[16,18],因此,在科尔沁沙地生态恢复方面有着广泛的应用;狗尾草在科尔沁沙地植被演替的各个阶段都有分布,在自然生境下,狗尾草可与差巴嘎蒿共存;大果虫实和胡枝子主要分布在半固定和固定沙丘生境中。在半固定和固定沙丘,差巴嘎蒿逐渐退出植被群落;冰草为多年旱生禾草,在我国北方广泛分布,由于其返青早、耐干旱、且适口性好、营养价值适中等特点,在畜牧业生产中具有一定的利用价值。

2016 年 9—10 月,分别于科尔沁沙地中南部奈曼旗半流动沙丘和固定沙丘进行种子采集。差巴嘎蒿叶为 2016 年 10 月中旬采集自半固定沙丘的成熟叶,针叶采回后风干保存。

1.3 实验设计与方法

差巴嘎蒿叶浸提液于 2017 年 4 月中旬制备,制备过程为:称取经 55 ℃烘干 48 h 后的差巴嘎蒿叶 100 g,在 2 L 烧杯中浸泡于 1 000 mL 超纯水中;充分搅拌均匀后,在黑暗条件下,于恒温培养箱中,(25 ℃)浸泡 24 h;经定性滤纸过滤后,收集液即为 100 $g \cdot L^{-1}$ 的差巴嘎蒿叶浸提液(原液)。本次实验设置 7 个浓度处理,分别为 0 $g \cdot L^{-1}$(对照)、10 $g \cdot L^{-1}$、20 $g \cdot L^{-1}$、40 $g \cdot L^{-1}$、60 $g \cdot L^{-1}$、80 $g \cdot L^{-1}$ 和 100 $g \cdot L^{-1}$,其中 0 $g \cdot L^{-1}$ 为超纯水,其余浓度浸提液由原液稀释获得。

种子萌发实验于 2017 年 4 月中旬开始。将采集的种子经"自来水冲洗→75% 乙醇消毒→去离子水冲洗"操作后,选取颗粒饱满、形状一致的种子均匀置于铺有双层充分湿润滤纸的培养皿(直径 100 mm)中;每皿 30 粒,分别用不同浓度的差巴嘎蒿叶浸提液对滤纸进行充分润湿,各处理重复 5 皿,共计 140 皿(4 物种 ×7 浓度 ×5 重复)。培养开始前用电子天平(精确度 0.01 g)称量各培养皿重量。试验开始后,于不同萌发时间统计各培养皿种子萌发状况(前 6 d 逐日统计,后 15 d 每 3 d 统计 1 次),统计后称量补充相应浓度的浸提液。本次萌发实验共持续 21 d(以连续 3 d 无种子萌发为终止标准)。本次萌发实验在人工气候箱中进行(BIC −800,上海博迅)。依据当地自然光热特征,设置培养条件为:光暗比为 16 h ∶ 8 h,光照强度 9 000 lx,光培养温度为 25 ℃,暗培养温度为 18 ℃。

1.4 数据分析

采用萌发率、萌发指数和化感指数 3 个指标对种子萌发特征及差巴嘎蒿叶片化感效应进行描述,其中萌发率和发芽指数的计算公式如下[18]:

萌发率 = 培养结束时种子总萌发数 ÷ 供试种子数 ×100%

萌发指数 = ∑(第 n 天种子净萌发数/萌发天数)

化感效应采用如下公式计算[26]:

化感指数 = 对照萌发率 ÷ 处理萌发率 −1

化感指数为负值表示促进效应,正值表示抑制效应,绝对值的大小表示化感效应的强弱。

数据采用 Microsoft Excel 和 SPSS 13.0 软件进行统计分析。百分率数据经反正弦转换后,采用单因素方差分析对不同条件处理下种子总萌发率、净萌发率和发芽指数进行分析,在 0.05 水平下用最小显著性差异(LSD)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 萌发率

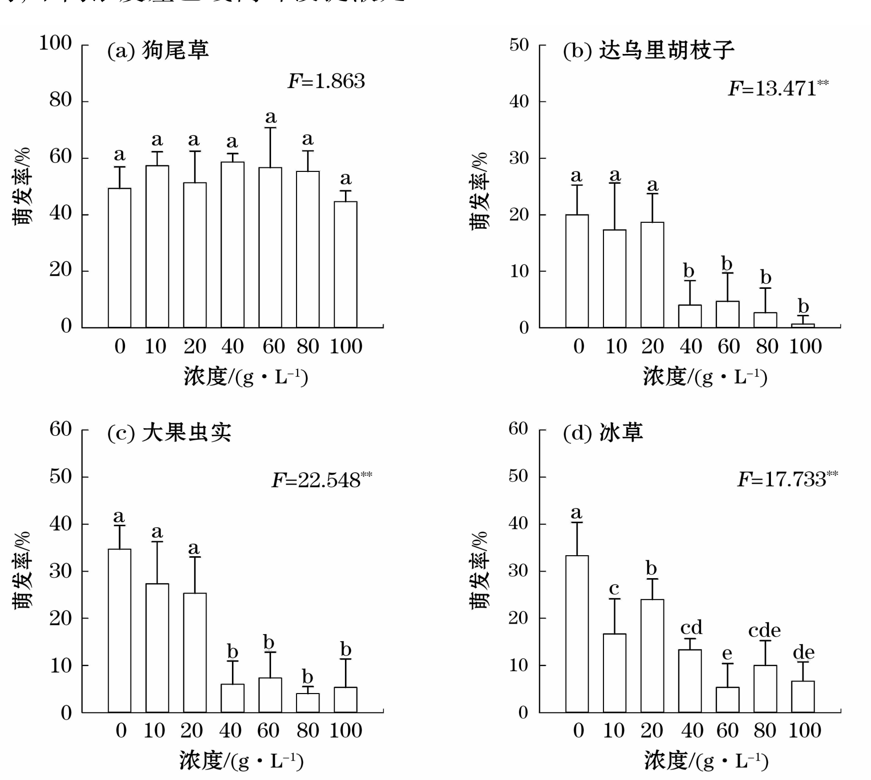
从图1可知,在差巴嘎蒿叶浸提液处理下,不同植物种子萌发率呈现不同的特征。其中狗尾草种子萌发率为44.7%~58.7%,且在不同浓度的差巴嘎蒿叶浸提液处理后差异性不显著($F=1.86$, $P=0.12$)。达乌里胡枝子(图1b)和大果虫实(图1c)的萌发率受差巴嘎蒿叶浸提液的影响较大,对照处理下的萌发率最高,分别为(20.0±5.3)%和(34.7±5.1)%,其后随浸提液浓度增加二者的萌发率逐渐下降。当浓度大于20 g·L^{-1}时,达乌里胡枝子和大果虫实的萌发率均显著低于对照($P<0.01$),10 g·L^{-1}和20 g·L^{-1}处理下的萌发率与对照的差异性不显著($P>0.05$)。冰草(图1d)种子的萌发率对差巴嘎蒿叶浸提液的响应更为敏感,各浓度处理下的萌发率均显著低于对照($P<0.05$)。不同浓度处理下,冰草种子萌发率表现为先升后降的趋势,20 g·L^{-1}处理下的萌发率显著高于其他浓度处理($P<0.05$)。

2.2 萌发指数

与萌发率不同,不同浓度差巴嘎蒿叶浸提液处理下狗尾草(图2a)的萌发指数存在极显著的差异性($F=6.33$, $P<0.01$)。当处理浓度为60 g·L^{-1}时,其萌发指数最大,为(17.1±3.1)%,且显著高于对照(12.9±3.2)%。此外,10 g·L^{-1}处理下的萌发指数(16.0±1.3)%也显著高于对照($P<0.05$),而当处理浓度为100 g·L^{-1}时,狗尾草的萌发指数(9.3±1.0)%显著低于对照($P<0.05$)。不同浓度差巴嘎蒿叶浸提液处理下达乌里胡枝子(图2b)的萌发指数与萌发率类似,即随处理浓度增加萌发指数逐渐下降,处理浓度大于20 g·L^{-1}时萌发指数显著低于对照($P<0.05$),10 g·L^{-1}和20 g·L^{-1}处理的萌发指数与对照差异不显著($P>0.05$)。大果虫实种子萌发指数也随着浸提液浓度增加而降低,当处理浓度大于10 g·L^{-1}时,萌发指数显著低于对照($P<0.05$),同时当处理浓度大于20 g·L^{-1}时,萌发指数大幅度低于对照。冰草种子的萌发指数与萌发率类似,各浓度浸提液处理下的萌发指数均显著低于对照($P<0.05$),同时20 g·L^{-1}处理下的萌发指数显著高于其他浓度处理($P<0.05$)。

2.3 化感指数

从图3可以看出,差巴嘎蒿叶浸提液对不同植



注:均为平均值+标准差,不同小写字母表示在$P<0.05$水平上存在显著性差异,**表示显著性水平为0.01。下同。

图1 不同浓度差巴嘎蒿叶浸提液对4种植物种子萌发率的影响

Fig.1 Effect of *Artemisia. halodendron* foliage water extract with different concentrations on seed germination rate of 4 species

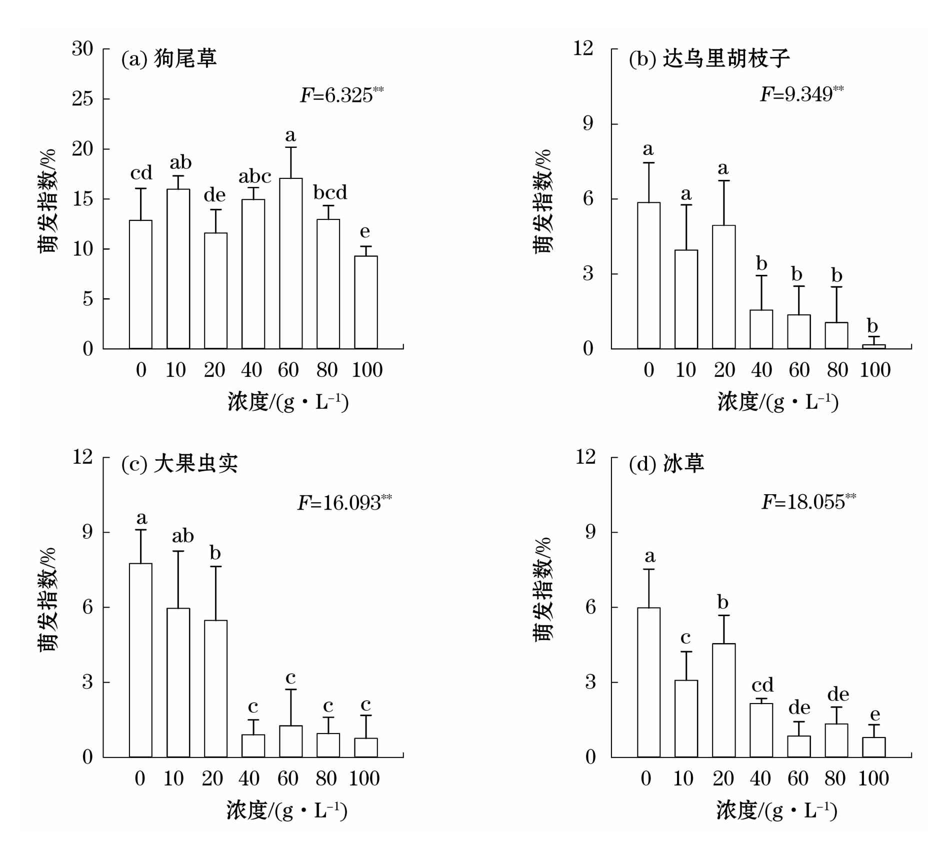
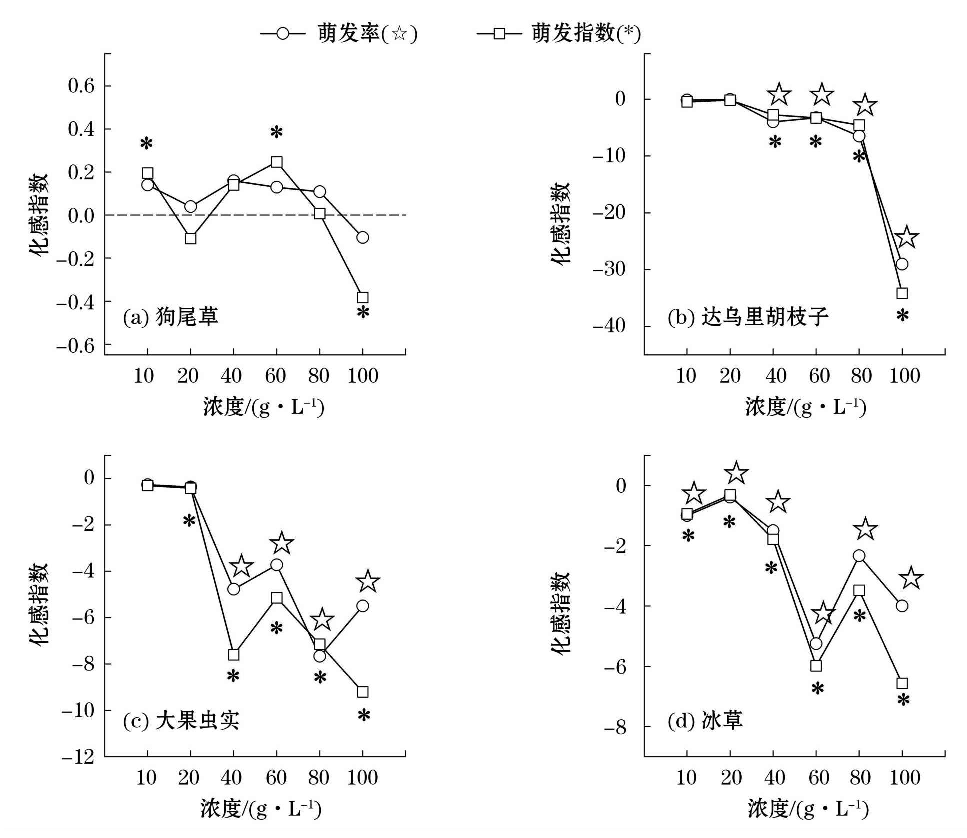


图 2　不同浓度差巴嘎蒿叶浸提液对 4 种植物种子萌发指数的影响

Fig. 2　Effect of *A. halodendron* foliage water extract with different concentrations on seed germination index of 4 species



注:萌发率和萌发指数由计算而来,☆和 * 分别表示基于萌发率的化感指数和基于萌发指数的化感指数达到显著性水平。

图 3　差巴嘎蒿叶浸提液对 4 种植物的化感指数

Fig. 3　Allelopathic index of the foliage water extract from *A. halodendron* on 4 species

物的化感效应存在较大的差异性。其中,狗尾草种子萌发受差巴嘎蒿叶浸提液的影响较小(图3a),且低浓度处理下存在一定的正效应,如基于萌发率的计算结果显示,10~80 g·L^{-1}浓度处理下的化感指数均大于0,即低浓度范围处理下狗尾草种子萌发率均高于对照,当处理浓度为100 g·L^{-1}时,差巴嘎蒿叶浸提液对狗尾草种子萌发表现出一定的抑制作用。基于萌发指数的分析结果表明,两个低浓度处理下(10 g·L^{-1}和60 g·L^{-1}),差巴嘎蒿叶浸提液对狗尾草表现出显著的促进作用($P<0.05$),100 g·L^{-1}处理下则表现为显著的抑制作用($P<0.05$)。而对于其他3种植物种子萌发,差巴嘎蒿叶浸提液均表现出不同程度的抑制效应(化感指数小于0)。处理浓度大于20 g·L^{-1}时,达乌里胡枝子种子萌发率和萌发指数均受到显著抑制,且随浓度增加,抑制效应逐步增强(图3b)。大果虫实种子萌发也受差巴嘎蒿叶浸提液的抑制(图3c)。当处理浓度大于10 g·L^{-1}时,萌发率的抑制效应达到显著性水平($P<0.05$);处理浓度大于20 g·L^{-1}时,萌发指数的抑制效应达到显著性水平($P<0.05$)。与其他3种植物相比较,冰草种子萌发受差巴嘎蒿叶浸提液的化感抑制更明显(图3d),各浓度处理下的抑制效应均达到显著性水平($P<0.05$)。

3 讨 论

3.1 萌发特征

种子萌发是植物完成生活史或种群繁衍的先决条件,除了受种子活力、寿命、激素水平等内在因素影响以外,种子萌发还受多种环境因素影响[18]。凋落物是影响种子萌发的重要环境因素之一,如在森林生态系统的研究发现,林窗和凋落物是影响云杉(*Picea asperata*)幼苗更新的主要因素,凋落物去除有利于云杉种子萌发,云杉凋落物的水浸提液对其种子萌发有显著的抑制效应[27]。另外,也有研究发现,在一定环境条件下,凋落物覆盖可促进种子萌发和幼苗生长,其原因是凋落物覆盖改变了土壤水分状况,有利于种子萌发[28]。本次研究结果显示,差巴嘎蒿叶浸提液对达乌里胡枝子、大果虫实和冰草种子萌发率和萌发指数均有显著的抑制效应,这与胡蓉等[27]的研究结果一致。另外,本次研究发现,不同植物种子萌发特征对凋落物的响应特征存在差异性,其中狗尾草种子萌发对差巴嘎蒿叶浸提液的响应较弱,而达乌里胡枝子、大果虫实和冰草等萌发特征受差巴嘎蒿叶浸提液的影响较大(图1和图2)。已有的研究也有类似的结论,如日本落叶松(*Larix kaempferi*)叶凋落物的水浸提液的研究表明,狗牙根(*Cynodon dactylon*)随着处理浓度的增加,萌发率、萌发指数和幼苗的根长、茎长和生物量均呈现先促进后抑制的现象[29],这与本研究中狗尾草种子萌发对差巴嘎蒿叶浸提液的响应特征类似;胡枝子(*Lespedeza formosa*)的各试验指标随处理浓度增加呈明显的受抑制现象[29],这与本研究中达乌里胡枝子、大果虫实和冰草的萌发结果一致。凋落物浓度是影响种子萌发的重要因素,如迷人杜鹃(*Rhododendron agastum*)的研究发现,自然条件下,过厚的凋落物影响迷人杜鹃幼苗形成和生长,当凋落物厚度小于4 cm时幼苗数量最多,此后随着凋落物厚度的增加幼苗数量逐渐减少[30]。在本次研究中,达乌里胡枝子、大果虫实和冰草的萌发率和萌发指数均随浸提液浓度增加而显著降低,其中达乌里胡枝子和大果虫实的萌发率在处理浓度≥40 g·L^{-1}时显著低于对照,而冰草萌发率在处理浓度≥10 g·L^{-1}时显著低于对照。

3.2 化感效应

化感作用可通过影响种子萌发和幼苗生长[31-32],进而对植被演替产生一定的作用[33-35]。化感作用通常表现为正负两方面作用[23],是植被演替过程中植物保持其竞争性的主要策略[36-37]。本研究表明,各浓度差巴嘎蒿叶浸提液均对冰草表现为负化感效应(图3d),这种完全的负化感效应已经在一些物种的研究中得到验证[4,38-39],如不同浓度(0~100 mg·mL^{-1})茎直黄芪(*Astragalus strictus*)水浸提液对燕麦(*Avena sativa*)、反枝苋(*Amaranthus retroflexus*)、白三叶和荠菜(*Capsella bursa-pastoris*)种子萌发均表现为抑制作用[4]。化感作用的另一个主要效应为低浓度促进、高浓度抑制现象[40-42]。如在加拿大一枝黄花(*Solidago canadensis*)浸提液对玉米幼苗生长的研究发现,0.02~0.11 g·mL^{-1}浸提液处理后玉米幼苗茎、叶、根的生长和生物量均高于对照,而当处理浓度增加到0.13 g·mL^{-1}以上时,玉米幼苗的生长则受到显著的抑制[43]。巨桉(*Eucalyptus grandis*)叶浸提液对紫花苜蓿(*Medicago sativa*)种子萌发和幼苗生长的研究也有类似的结论[44]。本研究中,差巴嘎蒿叶浸提液处理后狗尾草种子萌发率和萌发指数均表现为低促高抑现象,与

上述结论一致(图3a)。

植被演替是沙地生态恢复的重要过程。进入21世纪以来,科尔沁沙地逐渐出现恢复的特征[17]。在该过程中,流动沙丘逐渐固定,经历流动沙丘—半流动/半固定沙丘—固定沙丘的演替序列[21-23]。在沙地恢复过程中,土壤的变化相对较小,仅在浅层表现出碳氮积累的现象[45-46]。而植被则表现出更明显的演替特征,具体表现为:在流动沙丘阶段,植被盖度小,优势草本为沙米(*Agriophyllum squarrosum*),伴生少量的狗尾草和小灌木差巴嘎蒿;半流动沙丘植被盖度和物种丰富度增加,以差巴嘎蒿为优势物种,伴生物种为灌木小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)和狗尾草等一年生草本;到固定沙丘阶段,植被盖度和物种丰富度进一步增加,大果虫实、冰草等一年生草本和胡枝子等多年生草本物种逐渐增多,差巴嘎蒿逐渐退出该群落[21-23]。因此,在沙地恢复过程中,差巴嘎蒿是一个关键物种,在植被演替初期出现在半流动沙丘,可与狗尾草形成共生群落,而随着沙丘的进一步固定和植被的恢复,逐步形成与达乌里胡枝子、大果虫实等物种的竞争,最终退出演替。目前,差巴嘎蒿的竞争维持机制方面的研究尚未见报道。同时有关沙地植被演替的机理性研究较少,且存在一定的争议性。如一些研究认为,环境变化和物种属性影响着植被演替的速度[16],也有研究表明,化感作用影响着植物群落的结构和演替进程[29]。在科尔沁沙地的研究发现,差巴嘎蒿叶凋落物对半固定沙丘土壤种子库的发育有显著的化感效应,当叶凋落物浓度大于50 g·m^{-1}时,种子萌发和幼苗生长均受到显著的抑制[34]。本次研究表明,差巴嘎蒿叶浸提液对伴生物种狗尾草的化感抑制较小,甚至在低浓度状况下表现出一定的促进作用(图1a、图2a、图3a),这与已有的监测和研究结果一致[21-23],即差巴嘎蒿可与狗尾草形成共生群落。而对于大果虫实、达乌里胡枝子、冰草等物种,其种子萌发均受到差巴嘎蒿叶浸提液的抑制作用(图1~3),这与已有研究结果中的结论(差巴嘎蒿与达乌里胡枝子、大果虫实等没有共存现象)一致,说明差巴嘎蒿与这3种植物存在竞争性。由此表明,化感作用可能是差巴嘎蒿维持其竞争优势的重要机理。

4 结论

本研究表明,差巴嘎蒿叶浸提液对狗尾草的种子萌发影响较小,且低浓度处理有助于萌发,高浓度则表现出一定的抑制效应。10 g·L^{-1}和60 g·L^{-1}处理下狗尾草种子萌发指数显著提高,100 g·L^{-1}处理下的萌发指数显著低于对照到抑制;对于其他3个物种(达乌里胡枝子、大果虫实和冰草)的种子萌发,差巴嘎蒿叶浸提液表现出显著的抑制效应,同时这种化感抑制随处理浓度增加而增强。

参考文献(References):

〔1〕 焦晓林,毕晓宝,高微微. *p*-香豆酸对西洋参的化感作用及生理机制〔J〕. 生态学报,2015,35(9):3 006-3 013.〔Jiao Xiaolin,Bi Xiaobao,Gao Weiwei. Allelopathic effect of *p*-coumaric acid on American ginseng and its physiological mechanism〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2015,35(9):3 006-3 013.〕

〔2〕 刘成,陈晓德,吴明,等. 芦苇叶片化感作用对加拿大一枝黄花生长及生理生化特性的影响〔J〕. 草业学报,2014,23(3):182-190.〔Liu Cheng,Chen Xiaode,Wu Ming,et al. Allelopathic effects of *Phragmites communis* levels on the growth and physiobiochemical characteristics of *Solidago canadensis*〔J〕. Acta Prataculturae Sinica,2014,23(3):182-190.〕

〔3〕 缪丽华,王媛,高岩,等. 再力花地下部水浸提液对几种水生植物幼苗的化感作用〔J〕. 生态学报,2012,32(14):4 488-4 495.〔Liao Lihua,Wang Yuan,Gao Yan,et al. The allelopathy of aquatic rhizome and root extract of *Thalia dealbata* to seedling of several aquatic plants〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2012,32(14):4 488-4 495.〕

〔4〕 胡远彬,陈俊,肖天昊,等. 劲直黄芪水浸提液化感作用研究〔J〕. 草业学报,2013,22(6):136-142.〔Hu Yuanbin,Chen Jun,Xiao Tianhao,et al. Research on allelopathy of aqueous extract from *Astragalus strictus*〔J〕. Acta Prataculturae Sinica,2013,22(6):136-142.〕

〔5〕 Cheema Z A,Farooq M,Wahid A. Allelopathy:Current Trends and Future Applications〔M〕. Heidelberg:Springer,2012.

〔6〕 郭肖,孔德章,黄本婷,等. 农作物连作障碍产生机理与调控技术研究〔J〕. 作物研究,2016,30(2):214-219.〔Guo Xiao,Kong Dezhang,Huang Benting,et al. Studies on the mechanism and control technology of continuous cropping obstacle〔J〕. Crop Research,2016,30(2):214-219.〕

〔7〕 张晓玲,潘振刚,周晓锋,等. 自毒作用与连作障碍〔J〕. 土壤通报,2007,38(4):781-784.〔Zhang Xiaoling,Pan Zhengang,Zhou Xiaofeng,et al. Autotoxicity and continuous cropping obstacles:A review〔J〕. Chinese Journal of Soil Science,2007,38(4):781-784.〕

〔8〕 Jabran K,Mahajan G,Sardana V,et al. Allelopathy for weed control in agricultural systems〔J〕. Crop Protection,2015,72:57-65.

〔9〕 Rawat L S,Maikhuri R K,Bahuguna Y M,et al. Sunflower allelopathy for weed control in agriculture systems〔J〕. Journal of Crop Science and Biotechnology,2017,20(1):45-60.

〔10〕 王婧怡,姚丹丹,赵国琦,等. 黄花草木樨水浸提液对苏丹草和黑麦草的化感作用〔J〕. 草业学报,2017,26(8):85-92.〔Wang Jingyi,Yao Dandan,Zhao Guoqi,et al. Allelopathic effects of an aqueous extract of *Melilotus officinalis* on *Lolium multiflorum* and *Sorghum sudanenes*〔J〕. Acta Prataculturae Sinica,2017,26

(8):85－92.]

[11] 周淑清,黄祖杰,王慧,等.狼毒在土壤里腐解过程中对红豆草生化他感作用的研究[J].草业科学,2009,26(3):91－94.[Zhou Shuqing,Huang Zujie,Wang Hui,et al. Allelopathic effect of *Steura chamaejasme* decomposing in soil on *Onobrychis viciifolia*[J]. Pratacultural Science,2009,26(3):91－94.]

[12] 丁春发,魏小红,王芳琳.野生麻花秦艽中化感活性物质对牧草萌发及生理特性的影响[J].草业学报,2017,26(4):150－161.[Ding Chunfa,Wei Xiaohong,Wang Fanglin. Effects of active allelochemicals from feral *Gentiana straminea* on the seed germination and seedling physiological properties of forages[J]. Acta Prataculturae Sinica,2017,26(4):150－161.]

[13] Zhao X,Zheng G W,Niu X M,et al. Terpenes from *Eupatorium adenophorum* and their allelopathic effects on *Arabidopsis* seeds germination[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry,2009,57(2):478－482.

[14] Abhilasha D,Quintana N,Vivanco J,et al. Do allelopathic compounds in invasive *Solidago canadensis* s. l. restrain the native European flora?[J]. Journal of Ecology,2008,96(5):993－1 001.

[15] Zhang Q,Yao L J,Yang R Y,et al. Potential allelopathic effects of an invasive species *Solidago canadensis* on the mycorrhizae of native plant species[J]. Allelopathy Journal,2007,20(1):71－77.

[16] 赵哈林,赵学勇,张铜会,等.科尔沁沙地沙漠化过程及其恢复机理[M].北京:海洋出版社,2003.[Zhao Halin,Zhao Xueyong,Zhang Tonghui,et al. Desertification Processes and Its Restoration Mechanisms in the Horqin Sand Land[M]. Beijing:China Ocean Press,2003.]

[17] 王涛,吴薇,赵哈林,等.科尔沁地区现代沙漠化过程的驱动因素分析[J].中国沙漠,2004,24(5):519－528.[Wang Tao,Wu Wei,Zhao Halin,et al. Analyses on driving factors to sandy desertification process in Horqin Region,China[J]. Journal of Desert Research,2004,24(5):519－528.]

[18] 罗永清,赵学勇,朱阳春,等.不同培养条件下差巴嘎蒿种子萌发与幼苗生长特征[J].应用生态学报,2014,25(1):31－36.[Luo Yongqing,Zhao Xueyong,Zhu Yangchun,et al. Germination and seeding growth of *Artemisia halodendron* under different incubation environment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(1):31－36.]

[19] 罗永清,赵学勇,周欣,等.不同生境中差不嘎蒿(*Artemisia halodendron*)生长特征及地下生物量分布[J].中国沙漠,2015,35(1):152－159.[Luo Yonqing,Zhao Xueyong,Zhou Xin,et al. Relationship between growth character and belowground biomass distribution of *Artemisia halodendron*[J]. Journal of Desert Research,2015,35(1):152－159.]

[20] Qu H,Zhao X,Zhao H,et al. Litter decomposition rates in Horqin Sandy Land,Northern China:Effects of habitat and litter quality[J]. Fresenius Environmental Bulletin,2012,20(12):3 304－3 312.

[21] Zuo X,Knops J M H,Zhao X,et al. Indirect drivers of plant diversity-productivity relationship in semiarid sandy grasslands[J]. Biogeosciences,2012,9(4):1 277－1 289.

[22] Zuo X,Zhao X,Wang S,et al. Influence of dune stabilization on relationship between plant diversity and productivity in Horqin Sand Land,Northern China[J]. Environmental Earth Sciences,2012,67(5):1 547－1 556.

[23] 左小安,赵哈林,赵学勇,等.科尔沁沙地不同恢复年限退化植被的物种多样性[J].草业学报,2009,18(4):9－16.[Zuo Xiao'an,Zhao Halin,Zhao Xueyong,et al. Species diversity of degraded vegetation in different age restorations in Horqin Sandy Land,Northern China[J]. Acta Prataculturae Sinica,2009,18(4):9－16.]

[24] 张晶,左小安,吕朋,等.科尔沁沙地典型草地植物功能性状及其相互关系[J].干旱区研究,2018,35(1):137－143.[Zhang Jing,Zuo Xiao'an,Lv Peng,et al. Plant functional traits and interrelationships of dominant species on typical grassland in Horqin Sandy Land,China[J]. Arid Zone Research,2018,35(1):137－143.]

[25] 赵哈林,李瑾,周瑞莲,等.风吹时间和强度对玉米幼苗膜透性影响及其膜保护系统响应[J].干旱区研究,2016,33(3):519－524.[Zhao Halin,Li Jin,Zhou Ruilian,et al. Effect of wind blowing time and intensity on membrane permeability and its protection system of corn seedling[J]. Arid Zone Research,2016,33(3):519－524.]

[26] Williamson G B,Richardson D. Bioassays for allelopathy:Measuring treatment responses with independent controls[J]. Journal of Chemical Ecology,1988,14:181－187.

[27] 胡蓉,林波,刘庆.林窗与凋落物对人工云杉林早期更新的影响[J].林业科学,2011,47(6):23－29.[Hu Rong,Lin Bo,Liu Qing,et al. Effects of forest gaps and litter on the early regeneration of *Picea asperata* plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae,2011,47(6):23－29.]

[28] 王俊,王卓晗,杨龙,等.浇水频率和凋落物覆盖量对黧蒴锥种子萌发及幼苗存活的影响[J].应用生态学报,2008,19(10):2 097－2 102.[Wang Jun,Wang Zhuohan,Yang Long,et al. Effects of litter coverage and watering frequency on seed germination and seedling survival of *Castanopsis fissa*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2008,19(10):2 097－2 102.]

[29] 施妍,陈芳清.日本落叶松林凋落物对狗牙根、胡枝子种子萌发和幼苗生长的影响[J].江苏农业科学,2018,46(6):267－270.[Shi Yan,Chen Fangqing. Effects of *Larix kaempferi* litter on seed germination and seedling growth of *Cynodon dactylon* and *Lespedeza formosa*[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2018,46(6):267－270.]

[30] 周艳,陈训,韦小丽,等.凋落物对迷人杜鹃幼苗更新和种子萌发的影响[J].林业科学,2015,51(3):65－74.[Zhou Yan,Chen Xun,Wei Xiaoli,et al. Effects of litter on the seedling regeneration and seed germination of *Rhododendron agastum*[J]. Scientia Silvae Sinicae,2015,51(3):65－74.]

[31] Han C M,Pan K W,Wu N,et al. Allelopathic effect of ginger on seed germination and seedling growth of soybean and chive[J]. Scientia Horticulturae,2008,116(3):330－336.

[32] Jefferson L V,Pennacchio M. Allelopathic effects of foliage extracts from four *Chenopodiaceae* species on seed germination[J]. Journal of Arid Environments,2003,55(2):275－285.

[33] Zhang Y,Tang S,Liu K,et al. The allelopathic effect of *Potentilla acaulis*,on the changes of plant community in grassland,northern China[J]. Ecological Research,2015,30(1):41－47.

[34] Luo Y,Zhao X,Li Y,et al. Effects of foliage litter of a pioneer shrub (*Artemisia halodendron*) on germination from the soil seedbank in a semi-arid sandy grassland in China[J]. Journal of Plant Research,2017,130(3):1 013－1 021.

[35] Bruce W G,Richardson D. Bioassays for allelopathy:Measuring tr-

eatment responses with independent controls[J]. Journal of Chemical Ecology,1988,14(1):181－187.
[36] Rabotnov T A. Importance of the evolutionary approach to the study of allelopathy[J]. Soviet Journal of Ecology,1982,3:5－8.
[37] Putnam A R, Tang C S. The Science of Allelopathy[M]. New York:Wiley,1986.
[38] Prati D, Bossdorf O. Allelopathic inhibition of germination by *Alliaria petiolata* (Brassicaceae)[J]. American Journal of Botany, 2004,91(2):285－288.
[39] Turk M A,Tawaha A M. Allelopathic effect of black mustard (*Brassica nigra* L.) on germination and growth of wild oat (*Avena fatua* L.)[J]. Crop Protection,2003,22(4):673－677.
[40] Rodríguez A A,Grunberg K A,Taleisnik E L. Reactive oxygen species in the elongation zone of maize leaves are necessary for leaf extension[J]. Plant Physiology,2002,129(4):1 627－1 632.
[41] Prithiviraj B,Perry L G,Badri D V,et al. Chemical facilitation and induced pathogen resistance mediated by a root-secreted phytotoxin [J]. New Phytologist,2007,173(4):852－860.
[42] Zhang S S,Wang B,Zhang L,et al. Hormetic-like dose response relationships of allelochemicals of invasive *Solidago canadensis* L. [J]. Allelopathy Journal,2012,29(1):151－160.
[43] 叶小齐,吴明,邵学新,等.加拿大一枝黄花水提液对玉米幼苗生长的化感作用及其机理[J].草业学报,2014,23(6):217－224.[Ye Xiaoqi,Wu Ming,Shao Xuexin,et al. Effects of water extracts from *Solidago canadensis* on the growth of maize seedlings and the underlying photosynthetic mechanisms[J]. Acta Prataculturae Sinica,2014,23(6):217－224.]
[44] 钟宇,张健,杨万勤,等.不同土壤水分条件下生长的巨桉对紫花苜蓿的化感作用[J].草业学报,2009,18(4):81－86.[Zhong Yu,Zhang Jian,Yang Wanqin,et al. Allelopathic effects of *Eucalyptus grandis* on *Medicago sativa* growing different soil water conditions[J]. Acta Prataculturae Sinica,2009,18(4):81－86.]
[45] 韩娟娟,李玉强,王少昆,等.奈曼旗几种主要土地类型土壤碳氮特征[J].干旱区资源与环境,2014,28(1):37－42.[Han Juanjuan,Li Yuqiang,Wang Shaokun,et al. Characteristics of soil organic carbon and total nitrogen under different land use types in Naiman banner[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2014,28(1):37－42.]
[46] 李玉强,赵哈林,赵学勇,等.科尔沁沙地沙漠化过程中土壤碳氮特征分析[J].水土保持学报,2005,19(5):73－76.[Li Yuqiang,Zhao Halin,Zhao Xueyong,et al. Characteristics of soil carbon and nitrogen during desertification process in Horqin Sandy Land[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2005,19(5):73－76.]

Allelopathic Effect of Foliage Water Extract of *Artemisia halodendron* on Seed Germination of Four Herbaceous Species in Sandy Land

DING Jie-ping[1], YAN Zhi-qiang[2], CHEN Yin-ping[2], LI Yu-qiang[3], LUO Yong-qing[3]

(1. *Gansu Province Academy of Environmental Sciences*,*Lanzhou* 730000,*Ghansu*,*China*;

2. *School of Environmental and Municipal Engineering*,*Lanzhou Jiaotong University*,*Lanzhou* 730070,*Ghansu*,*China*;

3. *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources*,*Chinese Academy of Sciences*,*Lanzhou* 730000,*Ghansu*,*China*)

Abstract: *Artemisia halodendron* is one of the dominant species in vegetation succession for sand land restoration. At the initial stage of vegetation regeneration over sand land,*A. halodendron* was one of the dominant specie over semi-fixed dune. Thereafter it is replaced by other annual or perennial species,such as *Lespedeza bicolor*,*Corispermum macrocarpum* and *Agropyron cristatum* with the development of sand land recovery. However,the mechanism of its succession is still unclear. In this study,we focused on the allelopathic effect of leaf water extract with different concentrations (0,10,20,40,60,80 and 100 $g \cdot L^{-1}$) from *A. halodendron* on seed germination of one symbiosis specie *Seteria virids* and three competitive species in terms of *L. bicolor*,*C. macrocarpum* and *A. cristatum*. The results showed that the leaf water extract of *A. halodendron* affected seed germination of *S. virids* slightly,and which was promoted under low concentration of the foliage water extract of *A. halodendron*. However,the seed germination was significantly inhibited by the foliage water extract of *A. halodendron*,and this allelopathic inhabitation was increased with the increase of the concentration. In conclusion,*A. halodendron* showed a strong allelopathic effect to other species in vegetation regeneration in the process of sand land restoration. Allelopathic effect was induced by the matters released from the fallen leaves,which may be one of the vital strategies to keep competitiveness.

Key words: *Artemisia halodendron*; allelopathic effect; seed germination; allelopathic index; vegetation succession; Tongliao